第 38 卷第 3 期
2018 年 2 月

生 态 学 报
ACTA ECOLOGICA SINICA

Vol.38,No.3
Feb.,2018

DOI: 10.5846/stxb201612152581
汤旭,冯彦,鲁莎莎,张大红.基于生态区位系数的湖北省森林生态安全评价及重心演变分析.生态学报,2018,38(3):886-899.
Tang X,Feng Y,Lu S S,Zhang D H.Forest ecological security evaluation based on ecological location coefficient and gravity center transfer analysis in Hubei Province.Acta Ecologica Sinica,2018,38(3):886-899.

基于生态区位系数的湖北省森林生态安全评价及重心演变分析

汤 旭,冯 彦,鲁莎莎,张大红*
北京林业大学经济管理学院, 北京 100083

摘要:森林是地球生态系统中的重要组成部分,然而随着人类经济与社会的迅速发展,森林生态系统越来越脆弱,这会影响到人类的可持续发展,因此研究森林生态安全具有较强的现实意义。基于湖北省从 1999 年到 2014 年的面板数据,首先运用熵权法和模糊物元法计算出森林生态安全指数,然后结合气象类指标和地形类指标计算出生态区位系数,再用此系数来调整森林生态安全指数,还结合了 ArcGIS 软件和重心分析模型,得出如下结论:(1)生态区位系数最高的区域主要分布在湖北省东部和中部少数区域,最低的区域主要分布在湖北西部,而且生态区位系数与经济发达程度具有一定的耦合性;(2)从这 16 年间的森林变化来看,森林生态安全最差等级区域的县域增加了 100%,反映湖北森林生态安全形势整体不太乐观;(3)丹江口市、松滋市的森林生态安全指数在这 16 年一直保持上升趋势;(4)森林生态安全重心在 1999 年至 2007 年间的迁移方向为从西北到东南;2007 年至 2014 年从东往西迁移,移动速度较快。

关键词:生态区位系数;森林生态安全指数;状态指数;压力指数;重心演变

Forest ecological security evaluation based on ecological location coefficient and gravity center transfer analysis in Hubei Province

TANG Xu,FENG Yan,LU Shasha,ZHANG Dahong*
College of Economics and Management,Beijing Forestry University,Beijing 100083,*China*

Abstract: Forest ecosystems are important but fragile, and the rapid development of economy and society can affect the sustainable development of human beings.Therefore, the study of forest ecological security has a strong significance.Based on the date of forest panel from 1999 to 2014 in Hubei Province, this paper used the entropy method and fuzzy matter-element method to calculate the forest ecological security index, which was adjusted according to the ecological location coefficient obtained from the meteorological and terrain indices.Moreover,combined use of the ArcGIS software and the gravity analysis model in the present study revealed that:(1) the area with the highest ecological location coefficient was mainly distributed in the western and the central regions of Hubei Province.Futher,the area with the lowest ecological location coefficient was mainly distributed in the west,and the coefficient was correlated to a certain extent with economic development.(2)From the perspective of forest cover change in the 16-year study period, the counties with the worst forest ecological security grade increased 100%,reflecting that the overall situation of forest ecological security in Hubei is not optimistic.(3)The forest ecological security index of Danjiangkou and Songzi maintained an increasing trend during the study period.(4)The foest ecological security gravity center moved from the northwest to the southeast from 1999 to 2007, and thereafter from east to west at a high speed until 2014.

基金项目:国家林业局 2014 年林业重大问题调研课题(ZDWT201415)
收稿日期:2016-12-15; **网络出版日期**:2017-10-18
* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: zhangdahong591120@163.com

Key Words: ecological location coefficient; forest ecological security index; status index; pressure index; gravity center transfer

森林是地球生态系统中的重要组成部分,森林生态系统具有多重功能:它能够吸收二氧化碳,减缓地球的温室效应;它能够通过光合作用生产氧气,维持人类和各种动植物的需要[1-3];森林能够提供各种动植物所需要的营养和食物,所以能维持生物多样性[4-6];此外,森林还能起到防止风沙、保持水土、除尘净化的功能[7-8]。然而,随着人类经济与社会的迅速发展,人类对森林的砍伐利用日益增多,对林地的侵占也不断增加,这就使得森林的发展面临较大压力,森林生态系统越来越脆弱[9]。对森林生态系统脆弱性的评价可运用森林生态安全概念,森林生态安全是指森林生态系统的健康与完整性,也就是指森林对生态破坏与环境污染的容忍能力。森林生态是否安全主要看它能否满足人类的生存与发展,森林生态安全指数高,说明森林生态系统完整程度高,则人类的可持续发展能力强,反之,则人类的发展是不可持续的[10]。由于人类活动是不断变化的,所以森林生态安全也是动态变化的。从空间尺度来看,因为森林生态系统面临的威胁在各地是不同的,所以森林生态安全还具有区域性的特点。本文选择湖北省为研究对象,湖北地处长江中游,省内有长江三峡大坝和丹江口水库,是南水北调工程的水源地,生态区位非常重要,因此本文设计森林生态安全指数,并结合湖北省的森林现状和人类经济活动,来动态评估该省森林生态系统的健康与完整程度。

国外对森林生态安全的研究比较早,Moraes 等评估了亚马逊森林的生态安全[11],Hayes 和 Landis 评估了华盛顿西北区域的生态安全[12]。目前国内对于森林生态安全的研究不多,已有的研究中,毛旭鹏等评价了湖南省长沙、株洲、湘潭的森林生态安全状态,结果显示这 3 个地区生态安全状况一般,但压力呈下降趋势[13]。米锋等对 31 个省、市进行了森林生态安全评价[14]。冯彦等从空间计量角度分析了吉林省各县的森林生态安全指数,结论为各地区存在空间上的正相关性[15],王金龙等对 5 省 15 个试点县进行了森林生态安全评价,结果显示浙江淳安、吉林长白县、浙江遂昌县排名前三,而青海刚察县和湖北公安县生态安全值最差[16]。综合上述文献,这些研究对于自然条件的一些指标数据引用过少,大多只运用了年降水量、年积温和年日照时间等少数指标,而实际影响一个地区森林生态安全状态的指标还有海拔、坡度、风向等指标,因此上述研究所计算的森林生态安全指数还不能客观的反映各地森林生态安全状况。针对这个问题,本文将基于生态区位系数,引入海拔、坡度、风向等指标,以填补以上空白,使计算的森林生态安全指数能全面反映森林生态安全状况。

目前对于森林生态安全的分析大多基于 PSR 模型,但实际还可以引入更多技术方法,以提高森林生态安全分析的研究层次。以空间重心分析为例,目前森林生态安全在这方面的分析非常少,已有研究中,吴小节等运用重心方法对比研究了中国生态文明重心与经济重心[17],曹慧明等运用重心法分析了泸沽湖流域,发现旅游业是各个重心变化的主要因素[18]。为拓展研究范围,本文将引入重心分析模型来分析湖北省森林生态安全重心的动态变化,以更加深入地探究湖北森林生态安全的变化趋势。

1　评价指标体系构建思路与指标筛选过程

本文首先依据文献检索、频度分析法、专家咨询等方法来构建森林生态安全评价的指标体系。由于该指标体系不包含自然条件方面的基础指标,导致该方法在评估森林生态安全方面存在缺陷,因此本文构建了包含气象因素和地形因素的指标体系,用来计算生态区位系数。高低不同的生态区位系数,能够反映不同区域在植被生产力和物种分布上的差别,而这种差异对森林生态安全有较大影响。本文通过构建生态区位模型,来计算不同地区的生态区位系数,并将其作为调整系数来修正和补充森林生态安全指数,从而进一步保证森林生态安全指标评价体系的科学性。

1.1　森林生态安全指标体系

本文将 PSR 模型中 3 类指标合并为状态指标和压力指标,其中压力指标是把 PSR 模型中的压力指标和

响应指标结合起来,它反映的是人类对于森林的压力和人类保护森林的努力,都属于人类行为指标。本文在构建指数的过程中经历了 3 轮筛选:(1)首先通过研究森林生态安全定义,采用文献查询法和频度分析法挑选出频度较高的指标 25 个[19-23],然后征询林学、生态学等方面专家的意见,增加了 4 个指标,基本确定了 29 个指标,在此基础上开展数据收集工作。(2)在收集上述 29 个指标的过程中,本课题组发现有些指标的数据可获取度较低,因此本课题组于 2015 年 11 月对湖北省利川县、神农架林区两个典型县域进行了调研,并结合数据的实际可获取度,对上述 29 个指标进行了删减,确立了 20 个指标。(3)针对这 20 个指标,本课题组又经过专家问卷调查、专家会议咨询和课题组内部讨论,最后确定 14 个指标来计算森林生态安全指数,其中森林状态指标 5 个,森林压力指标 9 个。

尽管从最初的 25 个指标调整为最终的 14 个指标,但仍有部分区县的数据不符合要求:有的区县数据大面积缺失,有的区县数据少部分缺失。对于数据大面积缺失的区县,本课题组将这类区县排除在研究范围之外;对于数据少量缺失的区县,本课题组通过电话咨询与查询统计年鉴的办法对数据进行补充完善。根据数据收集的结果,本文最终确定湖北省 89 个区县为本文的研究样本。

本文设计的森林生态安全指数(Ecological Security Index,ESI)由森林状态指数和社会压力指数构成。森林状态指数由资源状况和灾害类指标计算得出,而通过一般压力指标、行为压力指标和维护活动指标可以计算出社会压力指数,具体如表 1 所示。

表 1 森林生态安全指标体系

Table 1 Forestry ecological security index system

结构 Structure	亚结构 Substructure	编码 Code	指标名称 Index name	公式 Formula	指标权重 Index weight
森林状态指数	资源状况	F01	森林覆盖率	森林面积/国土面积×100%	0.0709
Forest status index		F02	森林单位面积蓄积量	森林蓄积量/森林面积	0.0574
		F03	森林物种丰度指数	(权重 A×乔木林面积+权重 B×灌木林面积+权重 C×其他林地面积)/国土面积	0.0583
	灾害情况	F04	森林火灾致灾率	森林火灾致灾面积/森林面积×100%	0.0751
		F05	森林病虫鼠害致灾率	森林病虫鼠害致灾面积/森林面积×100%	0.0749
社会压力指数	一般压力	Y01	城镇化率	城镇人口数/县年末人口数×100%	0.0745
Social pressure index		Y02	人口密度	县年末人口数/国土面积	0.0748
		Y03	单位面积 GDP	GDP/国土面积	0.0750
		Y04	单位面积工业产值	工业产值/国土面积	0.0751
	行为压力	Y05	人类工程占用土地强度	建设用地面积/国土面积	0.0749
		Y06	二氧化硫排放强度	二氧化硫排放量/国土面积	0.0749
		Y07	工业废水排放强度	工业废水排放量/国土面积	0.0752
	维护活动	Y08	森林生态建设与保护投资强度	森林生态建设与保护投资/森林面积	0.0685
		Y09	年度造林比率	每年造林面积/森林面积×100%	0.0705

1.1.1 森林状态指数

资源状况类指标中,森林覆盖率(F01)与森林生态安全正相关。森林单位面积蓄积量(F02)反映森林的质量,蓄积量越大则森林生长情况越好,它与森林生态安全正相关,因此属于正向指标。森林物种丰度指数(F03)主要反映乔木、灌木和其他林地占国土面积的比重,它也与森林发展正相关,所以它在指标体系中属于正向指标[24-25]。

森林经常受灾害影响,所以本文用两个灾害指标来反应受灾情况:森林火灾致灾率(F04)与森林发展状况负相关,其值越大则森林越脆弱;森林病虫鼠害致灾率(F05)反映有害生物(如昆虫、老鼠、细菌、真菌、杂草

等)对森林的破坏情况[26]。这两个指标都为森林生态安全的逆向指标。

1.1.2　社会压力指数

由于人类对森林的影响很大,而且人类对森林的影响是多方面的,所以本文归类了一般行为、行为压力和维护活动这 3 类指标。城镇化率(Y01)、人口密度(Y02)、单位面积 GDP(Y03)、单位面积工业产值(Y04)构成一般行为指标,说明人类发展必然会增加对森林的索取,因此这 4 个指标与森林生态安全状况负相关,所以它们都是逆向指标[27]。行为压力指标中,由于人类工程占用土地强度(Y05)、二氧化硫排放强度(Y06)、工业废水排放强度(Y07)与森林发展是负相关关系,所以它们都属于逆向指标。随着人们生态保护意识的提高,无论是政府还是个人都积极保护森林,因此本文将森林生态建设与保护投资强度(Y08)、年度造林比例(Y09)列入维护活动类指标,这两个指标与森林的发展有正相关关系,因此都属于正向指标。

1.2　生态区位系数

生态区位系数是一个综合反映气象、地形等区域自然条件因素的指数,它能够通过影响物种分布和植被的生产力来对森林生态安全发生作用,因此可以用它来对森林生态安全指标体系进行修正和补充。生态区位系数以气象和地形类因素为基点,并以促进森林植被生长为目标,因此本文设计气象类指标和地形类指标来构建生态区位系数,用来反映自然条件的天然差异,并用来对森林生态安全指数进行调整。

国内已有学者的研究引用了生态区位系数,赵海凤等运用了生态区位系数对四川省生态服务价值进行调整[28]。李英等运用 14 个指标来构建生态区位系数,然后运用该系数来评估了伊春林区的生态服务价值[29]。高玲等运用地貌、水域距离、城镇距离、生态敏感点等指标来建立生态区位系数,并用该系数评估了海口市生态系统服务价值[30]。齐丹坤等运用生态区位系数对伊春林区的评估表明国家一级公益林生态区位重要程度最高[31]。

本文首先通过频度分析法,对有关生态区位评价的文献进行检索,对涉及的各项指标进行统计分析,从中选出使用频度高的指标;然后结合森林生态系统的特点,从中选择适用性强、数据可获取度高的指标;最后,运用专家咨询方法,对指标进行调整,最终探索性地选取年降水量、年均积温、年均气温、日照时数、日均风速、平均海拔、坡度、坡向等 8 个具体指标来构建生态区位系数的指标体系,其中前面 5 个属于气象类指标,后面 3 个属于地形类指标。本文根据各个区位指标的特征,将每个指标分为 5 个级别,等级越高就越有利于森林的生长,如表 2 所示。

表 2　生态区位系数评级表

Table 2　Evaluation table of ecological location coefficient

目标层 Target layer	准则层 Criterion layer	指标层 Index layer	一级 Level 1	二级 Llevel 2	三级 Level 3	四级 Level 4	五级 Level 5
生态区位系数 Ecological location coefficient	气象区位系数	年降水量/mm	<200	20—400	400—600	600—1000	≥1000
		年积温/℃	≤1600	1600—3200	3200—4500	4500—8000	>8000
		年均气温/℃	≤2	2—9	9—14	14—22	>22
		日照时数/h	≤1200	1200—2000	2000—2600	2600—3000	>3000
		日均风速/(m/s)	≥32.6	20.8—32.6	10.8—20.8	3.4—10.8	<3.4
	地形区位系数	平均海拔/m	≥3500	1000—3500	500—1000	200—500	<200
		坡度/%	≥35	25—35	15—25	5—15	≤5
		坡向	北	偏西或偏北	西或偏东	东或偏南	南

表 2 是 8 个指标的分级标准。在气象类指标中:年降水量越大,则森林物种越丰富;年积温越高,则越有利于植物的生长发育;年均气温越高,则越有利于植物的呼吸作用和光合作用;年日照时间越长,则可以促进植物苗木根系的生长,而且对植物开花也有明显影响。以上 4 个指标的数值越大,则越有利于植物生长,因此森林生态系统将会更安全。日均风速会改变空气的湿度和温度,风速较高会降低植物的生长量,而且强风干扰对森林的破坏较大,因此该指标数值越低则等级越高。

在 3 个地形类指标中,平均海拔越低,则植被越茂盛;坡度越低,则越有利于森林植被的生长;坡向是指坡面法线在水平面上的投影方向,从坡向来看,因为湖北地处北半球,所以各区、县地面朝南的坡向有利于植物生长,其次是朝东或偏南、朝西或偏东、偏西或偏北,最不利于植物生长的是朝北的坡向。

2 方法与模型

本文选用熵权法来计算指标权重,然后用模糊物元法与欧式贴近度来评价森林 ESI。

2.1 森林生态安全指数

2.1.1 模糊物元法

依据模糊物元法,构建湖北省各县域森林 ESI 的复合物元 R_{mn} :

$$R_{mn} = \begin{bmatrix} & M_1 & M_2 & \cdots & M_m \\ C_1 & x_{11} & x_{21} & \cdots & x_{m1} \\ C_2 & x_{12} & x_{22} & \cdots & x_{m2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ C_n & x_{1n} & x_{2n} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \tag{1}$$

式中, M_j 表示第 j 个事物($j=1,2,\cdots,$m), C_i 表示第 j 个事物的第 i 项特征($i=1,2,\cdots,n$), x_{ji} ($j=1,2,\cdots,m;i=1,2,\cdots,n$)为该事物的特征量值。

首先,计算从优隶属度。事物的特征值 C_i ,既有正向特征,也有负向特征,对于这些指标需要计算其相对于标准事物从优隶属度 $u(x_{ji})$ ($j=1,2,\cdots,m;i=1,2,\cdots,n$)[32]。计算方法为:

越大越优型指标:
$$u(x_{ji}) = \frac{x_{ji}}{\max x_{ji}} \tag{2}$$

越小越优型指标:
$$u(x_{ji}) = \frac{\min x_{ji}}{x_{ji}} \tag{3}$$

$\max x_{ji}$ 和 $\min x_{ji}$ 分别表示 C_i 中的最大值和最小值。然后计算新的模糊物元 R_{mn} :

$$R_{mn} = \begin{bmatrix} & M_1 & M_2 & \cdots & M_m \\ C_1 & u_{11} & u_{21} & \cdots & u_{m1} \\ C_2 & u_{12} & u_{22} & \cdots & u_{m2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ C_n & u_{1n} & u_{2n} & \cdots & u_{mn} \end{bmatrix} \tag{4}$$

然后,推导标准模糊物元、差平方、差平方模糊物元。

标准模糊物元 R_{0n} 由 $u(x_{ji})$ 的最大值来推导:

$$R_{0n} \begin{bmatrix} & N_{0n} \\ C_1 & u_{x01} \\ C_2 & u_{x02} \\ \vdots & \vdots \\ C_n & u_{x0n} \end{bmatrix} \tag{5}$$

计算差平方:

$$\Delta_{ji} = (u_{x_{0j}} - u_{x_{ji}})^2 \tag{6}$$

计算差平方模糊物元 R_Δ :

$$R_\Delta = \begin{bmatrix} & M_1 & M_2 & \cdots & M_m \\ C_1 & \Delta_{11} & \Delta_{21} & \cdots & \Delta_{m1} \\ C_2 & \Delta_{12} & \Delta_{22} & \cdots & \Delta_{m2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ C_n & \Delta_{1n} & \Delta_{2n} & \cdots & \Delta_{mn} \end{bmatrix} \tag{7}$$

2.1.2　欧式贴近度与森林 ESI 综合评价

本文采用采用欧式贴近度 $M(*,+)$ 方法来计算复合模糊物元 R_{PH}：

$$R_{PH} = \begin{bmatrix} & M_1 & M_2 & \cdots & M_m \\ PH_j & PH_1 & PH_2 & \cdots & PH_m \end{bmatrix} \tag{8}$$

$$\text{其中 } PH_j = 1 - \sqrt{\sum_{i=1}^{n} w_i \Delta_{ji}} \quad (i=1,2,\cdots,n, j=1,2,\cdots,m) \tag{9}$$

PH_j 即为未经生态区位系数修正的森林生态安全 ESI 值。

2.2　生态区位系数

本文运用 ArcGIS 软件对 8 个生态区位指标做栅格化处理,再对各评价指标进行分级赋值,最后运用专家打分法来确定各指标的权重,确定气象类系数与地形类系数的权重分别为 0.625 和 0.375。在确定指标的权重后,再对湖北省各区县的生态区位系数进行评估。

在计算生态区位系数时,首先应依据表 2 的评级标准和参评单元评价因子的现状值,确定现状区位系数评分空间分布图,然后计算指标层区位系数分值:

$$F_{ij} = \sum_{k=1}^{n} (S_{ijk} \times W_{ijk}) \tag{10}$$

F_{ij}、S_{ijk}、W_{ijk} 分别为 j 指标的区位系数分值、评价指标现状值、权重值,n 为指标个数。

计算准则层区位系数分值:

$$F_i = \sum_{j=1}^{n} (F_{ij} \times W_{ij}) \tag{11}$$

F_i 是准则层 i 目标区位系数分值, F_{ij}、W_{ij} 分别是 j 指标的区位系数分值、j 指标相对准则层 i 目标的权重值, n 是准则层指标个数。

计算目标层区位系数综合分值:

$$F = \sum_{i=1}^{n} (F_i \times W_i) \tag{12}$$

F 为区位系数综合分值, W_i 是准则层 i 目标的权重值, n 是目标个数。

2.3　修正的森林 ESI

在计算出森林生态安全值 PH_j 和区位系数综合分值 F 后,可以通过

$$\mathrm{ESI} = PH_j \times \frac{F}{\bar{F}} \tag{13}$$

ESI 为经生态区位系数修正后的森林生态安全值, PH_j 为最初的森林生态安全值, F 为区位系数综合分值, $\bar{F}$ 为全省区位系数的平均值。

2.4　重心分析模型

通过查询统计年鉴,可得到湖北省各区县中心的经纬度坐标(x_i , y_i),然后以修正的森林生态安全 ESI_i 为权重,可求出湖北省生态安全重心的地理坐标:

$$X = \sum_{i=1}^{n} \mathrm{ESI}_i x_i / \sum_{i=1}^{n} \mathrm{ESI}_i \qquad Y = \sum_{i=1}^{n} \mathrm{ESI}_i y_i / \sum_{i=1}^{n} \mathrm{ESI}_i \tag{14}$$

由于各地区森林保护的力度不同,而且经济与社会的发展速度也有高低差异,所以各地区森林状态指数

与社会压力指数都会相应发生改变，这会引起全省森林生态安全的重心发生迁移，依据勾股定理，每年重心迁移的距离为：

$$D_{i-j} = R \times \sqrt{(Y_i - Y_j)^2 + (X_i - X_j)^2} \tag{15}$$

D_{i-j} 表示重心从第 i 年至 j 年的迁移距离，R 为常数，一般取值 111.111。

3　研究区域与数据来源

3.1　研究区域

湖北地处长江中游，森林资源丰富。湖北省国土面积 1859.00 万 hm^2，其中森林面积 736.27 万 hm^2，森林覆盖率 39.61%，比全国平均水平高出 17.98%。由于森林在防止洪涝灾害和水土流失方面作用突出，因此湖北省森林生态系统的安全程度对本省和长江流域中下游都非常重要，所以对湖北森林生态安全指数的研究具有比较现实的意义。本文依据数据的可获取度，以湖北省 89 个区县为研究样本。

3.2　数据来源

本文所有数据来源于森林生态安全指数研究项目，涉及湖北省 89 个县域从 1999 年至 2014 年的面板数据。数据收集分为一试和二试两个阶段：

(1) 一试阶段，本课题组于 2014 年 10 月将数据表格下发湖北省各区、县林业局。然后对收集整理的县域数据进行统计，将这些数据分为全部填报、部分填报、全部缺失 3 种类型。

(2) 二试阶段，对于全部缺失的县域数据，将此县排除在本研究范围之外。对于填报了部分数据的县域，本课题组再次进行了指导，并通过电话沟通和统计资料查询，补充了缺失数据。

4　实证分析

4.1　熵权计算结果

依据熵权法，可以求出森林生态安全 14 个指标的权重，本文将计算结果列入表 1 最后一列。

表 1 中所有指标权重合计为 1，权重的大小能够反映各指标对总体 ESI 值的影响程度。从该表可以看出：工业废水排放强度(Y07)权重最高，为 0.0752。其次为单位面积工业产值(Y04)与森林火灾受灾率(F04)，皆为 0.0751。森林单位面积蓄积量(F02)权重最小，仅为 0.0574。森林物种丰度指数(F03)的权重稍高于森林单位面积蓄积量，为 0.0583。

4.2　生态区位系数计算结果

本文基于表 2 的 8 个指标和湖北 89 个区县的数据，运用公式 10 到公式 12，计算出湖北省区位系数。本文运用 ArcGIS 软件，采用自然断裂法将湖北省各区域的生态区位系数采用五分位图展示出来，如图 1 所示。

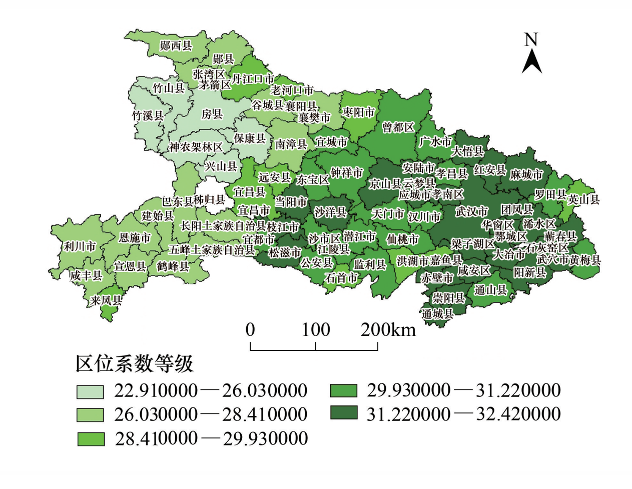


图 1　湖北省生态区位系数图

Fig.1　Ecological location coefficient map of Hubei Province

图 1 为湖北省区位系数等级分布。本文基于自然断裂法将区域系数分为 5 个等级，分别为：31.22001—32.42000、29.93001—31.22000、28.41001—29.93000、26.03001—28.41000、22.91000—26.03000。从该图可以看出，区位系数最高(31.22001—32.42000)的区域主要分布在湖北省东部和中部少数区域，如武汉市、鄂州市、当阳市、枝江市、松滋市等。区位系数次高区域(29.93001—31.22000)主要分布在中部区域如增都区、广水市、钟祥市、公安县、监利县等地，该区域还在西部 2 个区县(通山县、黄梅县)有所分布。区位系数最低

的区域(22.91000—26.03000)主要分布在湖北西部,如神农架林区、竹溪县、竹山县、兴山县和保康县。

从总体来看,湖北全省的生态区位系数平均值为 29.94719。生态区位系数较高的区域主要分布在湖北省东部和中部,这些区域自然基础条件较好,适合森林植物的生长。区位系数最高值出现在东北区域的红安县(区位系数值为 32.42000)。而生态区位系数较差的区域主要分布在湖北省西部,以神农架林区为例,该区域的生态区位系数仅为 22.91000,在湖北省排名倒数第一,说明该区域并不是最适合森林植被生长的区域。与此同时,生态区位系数较好的区域大多聚集在武汉市周边,这些地区都是湖北省经济最发达的区域,而生态区位系数较差的区域一般都集中在湖北省西部,这些地方交通不便,人口稀少,经济相对比较落后,因此生态区位系数与地区经济发展水平有一定的耦合性。

4.3　修正的森林生态安全指数

在计算出 14 个指标的熵权后,结合模糊物元法和欧式贴近度方法,本文计算出初步的森林生态安全指数值。

因为自然基础条件对各地森林生态安全指数有根本性的影响,所以需要用基于坡度、风向、海拔、风速等指标的区位系数来修正前期计算的森林生态安全值。在计算出湖北省各区县的生态区位系数后,再求出全省生态区位系数的平均值,然后用各个生态区位系数除以该平均值,得到修正系数,再分别乘以各地的森林 ESI 值,可得到经生态区位系数修正的森林生态安全 ESI 值。

基于修正的森林生态安全指数,本文将 1999、2004、2009、2014 年这 4 年的森林生态安全值用 ArcGIS 图展现出来,如图 2 所示。

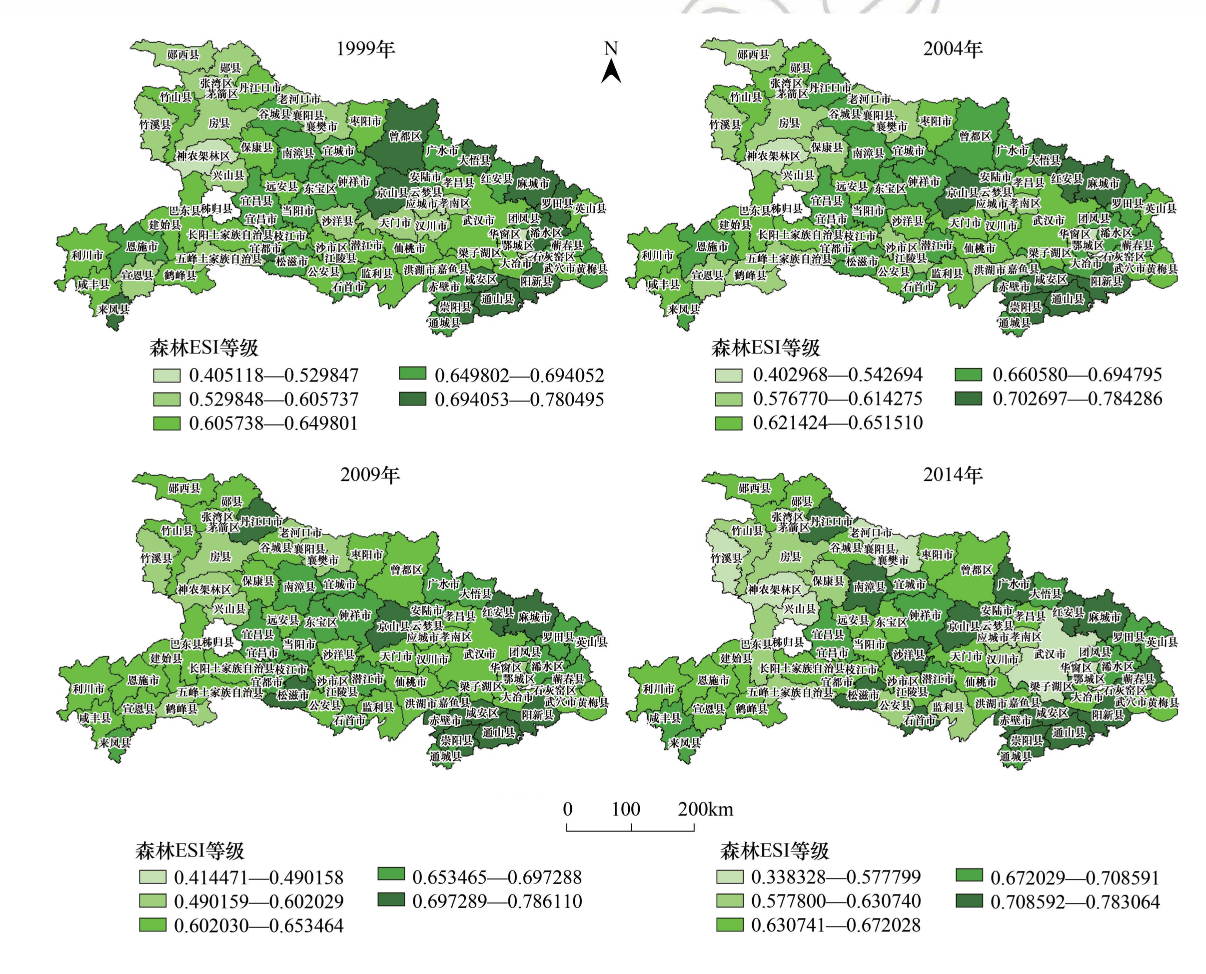


图 2　湖北省森林生态安全分布

Fig.2　Forestry ecological security distribution in Hubei Province

图 2 为湖北省森林 ESI 在 1999、2004、2009 和 2014 年的五分位分布图。从 1999 年来看,森林生态安全最高等级区域主要分布在湖北东部,还分布在北部部分区域,以及南部个别区域。森林生态安全最低等级区域零星分布在东部、中部和西部的黄州区、襄樊市、云梦县以及神农架林区。

从 2004 年的分布图来看,最好区域主要分布在湖北省西北部和西南部,与 1999 年相比,减少了浠水县、曾都区、来凤县和宜都市。而生态安全等级最差的区域没有变化。生态安全等级排名其次的区域与 2004 年相比有了明显扩大,北部增加了丹江口市和曾都区,西部增加了浠水县。

从 2009 年来看,大悟县已退出生态安全的最好区域,但新增了丹江口市和松滋市。神农架林区的生态安全值有所上升,从最差等级的区域已上升为较差区域。

从 2014 年来看,最好区域新增了 5 个县,但是生态安全最差区域也大幅上升,在湖北东部新增了武汉市、华容区,北部新增了襄阳县、老河口县,西部新增兴山县、竹溪县、张湾区、茅箭区等 8 个县,与 1999 年相比的增幅为 100%。

从这 4 个年份的森林生态安全的等级变化来看,在这 16 年间,丹江口市、松滋市一直保持上升趋势,丹江口市森林生态安全值在 1999 年还属于五级分类中的中间区域,但它在 2004 年和 2009 年分别上升一个等级直到 2014 年的最高等级。丹江口市森林 ESI 值的持续上升在于该地区非常重视植树造林,1999 年该地区造林面积为 $2553hm^2$,接下来几年每年造林面积持续上升,在 2003 年达到最高值,该年度造林面积为 $11000hm^2$。正因为该地区重视林业保护,所以该地区的森林 ESI 等级持续上升。松滋市森林 ESI 的上升主要体现在 2004 年到 2009 年,主要在于该地区森林投资与保护强度持续上升,1999 年该地区森林投资与保护强度为 669.5 元/km^2,经过几年持续追加投入,2009 年达到 2802 元/km^2的峰值。这 16 年的另一个重大变化是森林生态安全最差区域在 2014 年大幅上升。以武汉市为例,2009 年该市森林 ESI 值还处在五级分类中的中间区域,但到了 2014 年则直接跌落到最差等级区域,这主要是因为武汉市在这些年份经济发展速度太快,从而给森林造成太多压力。

4.4 森林生态安全状态指数

为了更加清楚地分析湖北省森林生态安全值的变化,本文将森林生态安全指数分解为状态指数与压力指数。本文首先计算各区县从 1999 年到 2014 年的状态指数,然后将 1999 年、2004 年、2009 年和 2014 年状态指数的变化用 ArcGIS 软件制图,如图 3 所示。

图 3 反映了湖北省森林状态指数的变化。从以上 4 个图来看,状态指数最高区域比较集中,主要分布在湖北省西部区域。从状态指数最高等级区域来看,1999 年主要分布在湖北西部的 11 个县,还分布在西南的 4 个县。2004 年该区域增加了建始县。2009 年西部 3 个县下降了一个等级。2014 年状态指数和 2009 年相比,变化不大。

从状态指数最差区域来看,主要集中在云梦县和黄州区,除了 2009 年增加了部分区域外,其他年份基本没有变化。该指数的较好区域主要分布在湖北西部和东南、东北及北部几个县域,而且在这 4 个年份变化不大。

4.5 森林生态安全压力指数

由于本文对压力指数中的逆向指标做了标准化处理,所以压力指数越大,说明森林面临的压力越小;反之,则森林发展的压力越大。本文计算了湖北省森林生态安全的压力指数,并将 1999 年、2004 年、2009 年和 2014 年的压力指数体现在 GIS 图上,如图 4 所示。

图 4 反映了湖北省森林压力指数的变化。颜色最浅区域为压力最小区域,从该区域的变化来分析,1999 年主要分布在湖北中部和北部的京山县、曾都区,西部的竹山县和西南的恩施市、来凤县。2004 年该区域有所扩大,西北新增了郧县、丹江口市两个县,中部新增了南漳县、宜城市两个县,西南新增了 3 个县,南部也新增了 3 个县,东南新增了通山县,减少了来凤县。从 2009 年来看,压力最小区域大幅减少,具体来看,西南区域减少了 3 个县(利川市、恩施市、巴东县),西北减少了两个县(老河口县、郧县)、中部减少了 1 个县(宜昌



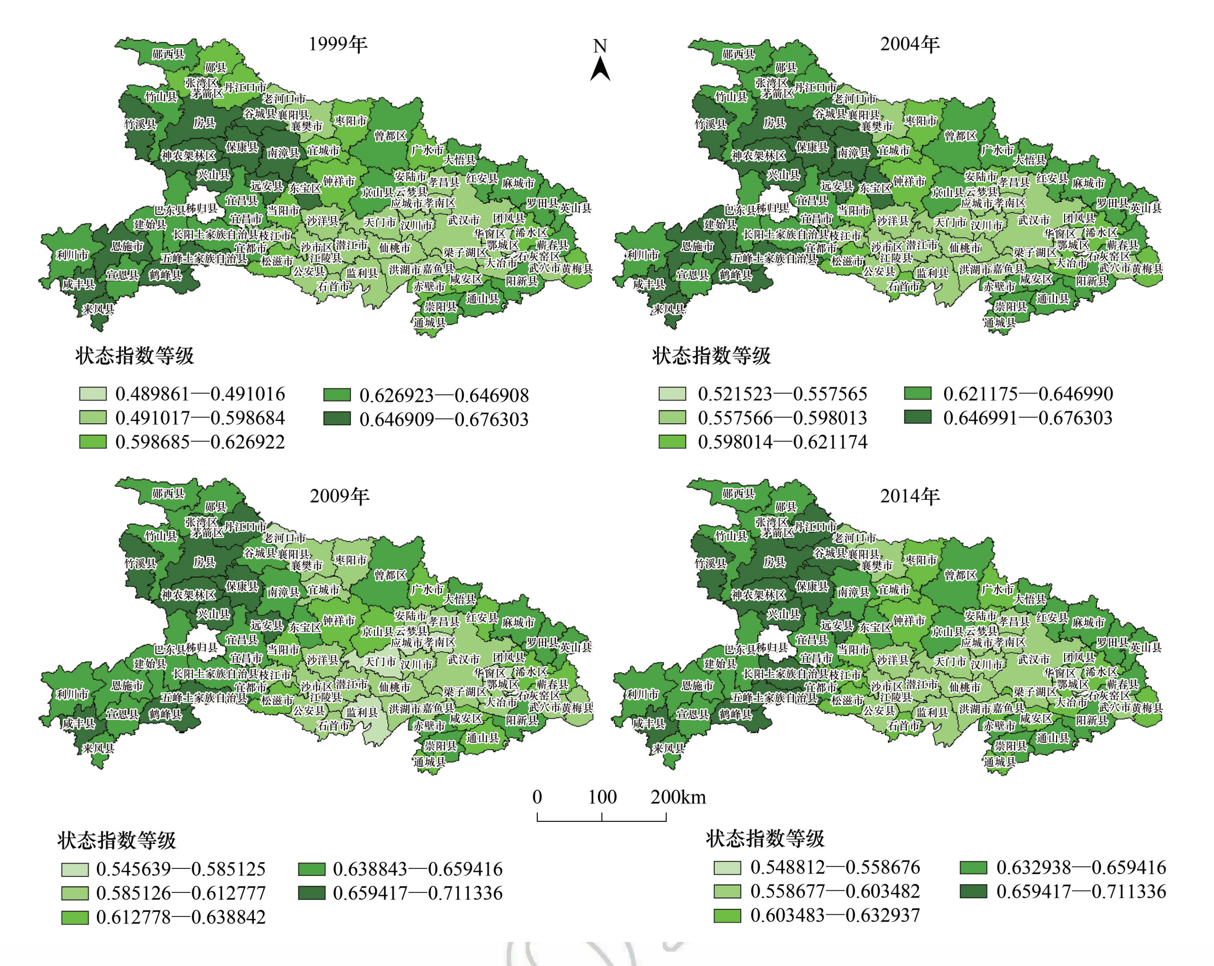


图 3　湖北省森林生态安全状态指数

Fig.3　Forestry ecological safety status index in Hubei Province

县)。从 2014 年来看,竹山县、保康县、咸安区因为压力上升而从该等级区域消失,北部的广安市和宜城市压力下降所以压力指数落在该区域。

图 4 中颜色最深的部分即为压力最大区域。从压力最大区域来看,1999 年、2004 年和 2009 年压力最大区域都为东部下陆区,但到了 2014 年压力最大区域急剧扩大,西北新增了 2 个县(张湾区、茅箭区),北部增加了襄阳县,中南部增加了两个区县,东部新增了武汉市、华容区、黄州区和鄂城区。该等级区域的的迅速扩大说明最近几年经济的发展给森林增加了太多压力,需要适度放缓经济发展步伐,减少污染排放,以为森林发展创造有利条件。

4.6　重心分析

依据重心分析模型中的公式 14,并结合历年森林生态安全 ESI 值,可以计算出从 1999 年至 2014 年的森林生态安全重心坐标,如表 3 所示。

表 3 反映了最近 16 年森林生态安全重心的变化,从该表可以看出,历年重心基本在 112°45′34″E 和 112°47′2″E之间、30°50′1″N 和 30°50′42″N 之间波动。

本文将历年重心的坐标标记在坐标图上,如图 5 所示,通过该图可以分析重心演变的轨迹。

图 5 反映了 1999 年至 2014 年湖北省森林生态安全重心的演变轨迹,从该图可以看出,重心演变基本可以分为两个阶段:第一阶段(1999 年至 2007 年)从西北区域向东南区域迁移;第二阶段(2007 年至 2014 年)从东往西迁移。第一阶段的重心迁移说明湖北省东南区域的森林生态安全指数改善较大,第二阶段的重心迁移说明湖北省西部的森林生态安全指数提升较大,从而带动重心向西迁移。

第一阶段重心向东南迁移的原因在于北部和西部几个县域的森林 ESI 值下降较大(如曾都区、宜都市、来

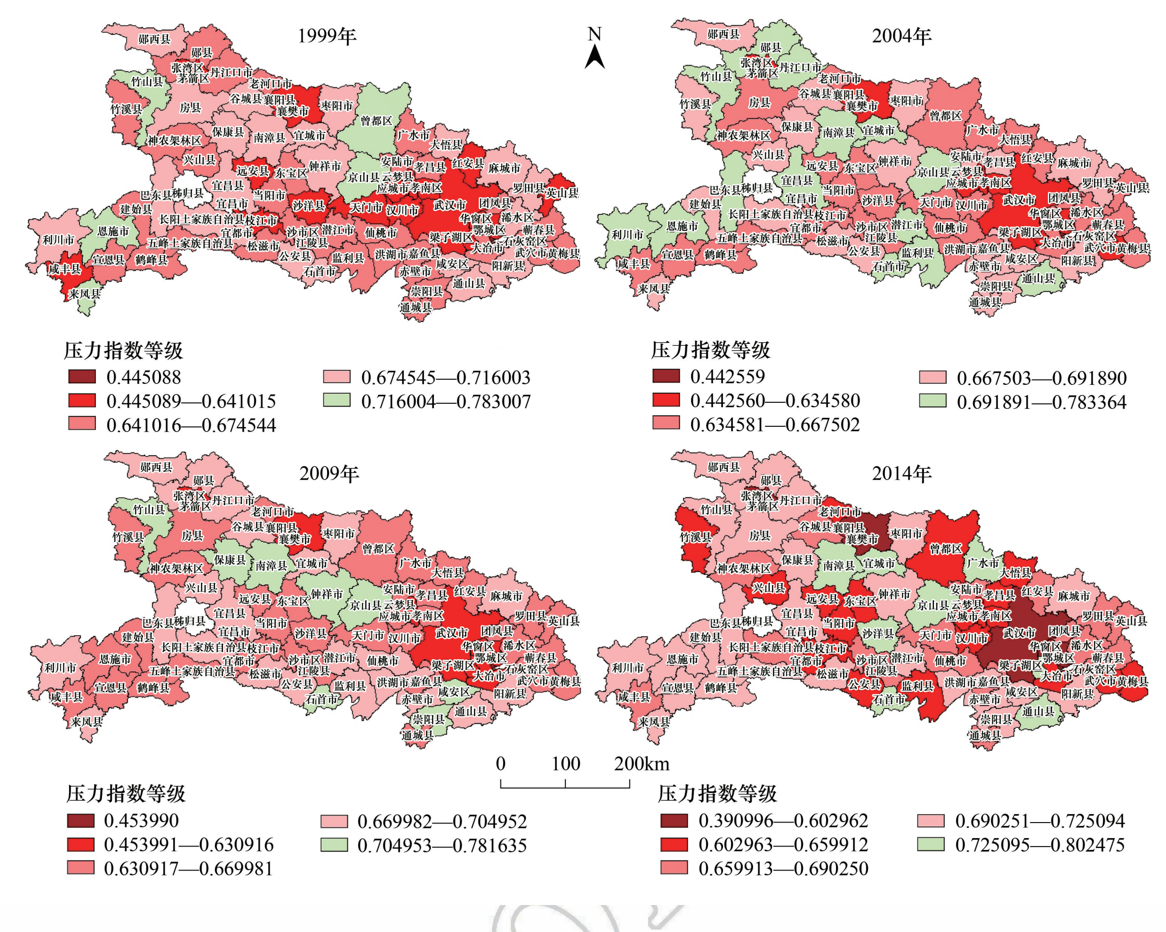


图 4 湖北森林生态安全压力指数

Fig.4 Forestry ecological security pressure index in Hubei Province

表 3 湖北省森林生态安全重心

Table 3 Foesty ecological security gravity center in Hubei Province

年份 Year	经度 Longitude	纬度 Latitude	年份 Year	经度 Longitude	纬度 Latitude
1999	112°46′15″E	30°50′30″N	2007	112°47′2″E	30°50′8″N
2000	112°45′36″E	30°50′31″N	2008	112°46′47″E	30°50′14″N
2001	112°45′52″E	30°50′30″N	2009	112°46′44″E	30°50′13″N
2002	112°45′55″E	30°50′42″N	2010	112°46′3″E	30°50′7″N
2003	112°46′17″E	30°50′37″N	2011	112°46′18″E	30°50′13″N
2004	112°46′22″E	30°50′22″N	2012	112°46′11″E	30°50′6″N
2005	112°46′38″E	30°50′24″N	2013	112°45′34″E	30°50′12″N
2006	112°46′58″E	30°50′20″N	2014	112°46′6″E	30°50′1″N

凤县),而南部的赤壁市在此阶段由于退耕还林和植树造林工作做得较好,因此当地的森林 ESI 值上升较大,从而促进了森林生态安全重心向东南方向的迁移。

第二阶段重心向西迁移的原因在于东部的武汉市各区、华容区和鄂城区的森林 ESI 值都有下降,而中西部南漳和沙洋这两个县的 ESI 值改善明显。南漳县 2014 年的森林覆盖率与 2011 年相比提高了 3.1 个百分点,达到 61.79%,而沙洋县在此期间每年完成造林面积都在 2000hm^{2}以上,这些都使得两个县的森林生态安全指数得到迅速提升,从而带动森林生态安全重心自东向西迁移。

为更加全面地掌握这两个阶段的重心迁移方向、距离及速度,本文统计了这两个阶段的重心演变数据,如

表 4 所示。

表 4　1999 年至 2014 年重心演变统计

Table 4　Gravity center variation statistics from 1999 to 2014

时间 Time	南北迁移距离 North-south migration distance/km		东西迁移距离 Earth-westh migration distance/km		总方向 General direction	总距离 Total distance/km	年均距离 Average annual distance/km	速度 Speed
	年均迁移距离	阶段迁移距离	年均迁移距离	阶段迁移距离				
1999—2007	0.08	0.67	0.18	1.46	西北到东南	1.60	0.20	慢
2007—2014	0.03	0.20	0.25	1.74	从东往西	1.75	0.25	快

从表 4 来看,森林生态安全重心在第一阶段(1999 年至 2007 年)的南北方向迁移了 0.67km,东西方向迁移了 1.46km,总体移动方向为从西北到东南,移动距离为 1.6km,这 8 年年均移动距离为 0.2km。第二阶段(2007 年至 2014 年)的重心在南北方向迁移了 0.2km,东西方向迁移距离为 1.74km,总体移动方向为从东至西,总距离为 1.75km,年均迁移距离为 0.25km,迁移速度比第一阶段有所加快,反湖北省西部区域的森林 ESI 指数在第二阶段进步较大。

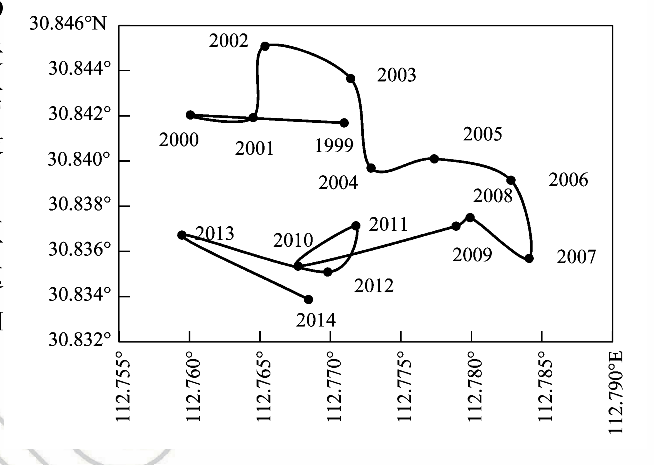


图 5　1999 年至 2014 年的重心演变轨迹

Fig.5　Transfer map of gravity center from 1999 to 2014

5　结论与讨论

5.1　结论

本文首先运用熵权法和模糊物元法计算出湖北省各区县的森林 ESI 指数,然后计算湖北各区县的生态区位系数,并用来修正森林 ESI,得到修正后的森林生态安全指数。本文还运用了 ArcGIS 和重心模型来分析湖北各区县的森林 ESI 指数,结论如下:

(1)生态区位系数最高(31.22001—32.42000)的区域主要分布在湖北省西部和中部少数区域,如武汉市、鄂州市、当阳市、枝江市、松滋市等。区位系数最低的区域(22.91000—26.03000)主要分布在湖北西部。

(2)从 1999 年到 2014 年森林生态安全指数的变化来看,ESI 指数最差等级区域增加明显,尤其是从 2009 到 2014 年间,在湖北东部新增了武汉市、华容区,北部新增了襄阳县、老河口县,西部新增了兴山县、竹溪县、张湾区、茅箭区等 8 个区县,与 1999 年相比的增幅为 100%,说明湖北省森林生态安全形势不太乐观。

(3)从状态指数来看,最高等级区域主要分布在湖北省西部区域,反映西部森林状态较好,而最差区域主要集中在云梦县和黄州区。从压力指数来看,1999 年、2004 年和 2009 年压力最大区域都为东部下陆区,但到了 2014 年压力最大区域急剧扩大。以武汉市及周边区域为代表,该地区压力迅速上升,妨碍了当地森林生态安全指数的提升。

(4)湖北省森林生态安全重心演变分为两个阶段:第一阶段(1999 年至 2007 年)从西北向东南迁移距离了 1.6km,年均迁移 0.2km;第二阶段(2007 年至 2014 年)从东往西迁移了 1.75km,年均移动 0.25km,移动速度较快。第一阶段的重心迁移说明湖北省东南几个区县森林保护工作做得较好,从而带动森林生态安全值的提升,而第二阶段的重心迁移说明湖北西部区县森林生态建设的成效较好,使得森林生态安全值提升较大,从而带动重心向西迁移。

5.2　讨论

从本文分析结果来看,处于生态区位系数最高等级的中部和东部区域的森林 ESI 值却属于最差等级区域,说明人口、经济、废水和废气的排放抑制了该区域森林的发展。以武汉市及周边地区为例,尽管生态区位系数的等级最高,但从森林生态安全值来看,却属于湖北省最差等级的区域。因此,本文建议该地区政府、企

业和居民高度重视植树造林、森林维护和环境治理工作,并尽量减少对森林生态系统的破坏,为促进该地区森林的发展创造出良好条件。

从森林生态安全的研究方法来看,目前指标赋权大多运用层次分析法和专家打分法,它们的优点是能判断各指标在生态上的重要性,缺点是对各指标的差异性重视不够。本文熵权法与之相反,对各指标的差异性较为重视,但无法分辨各指标的生态重要程度[33-34],因此本文将在以后的研究中引入组合赋权法,即将客观赋权法与主观赋权法综合起来[35-38]。除此之外,其他学者对各指标之间的相关性作了较为深入地分析,因此本文将加以借鉴,并引入主成分分析方法来进行指标筛选。本文生态区位系数仅考虑了气象类指标和地形类指标,但在影响森林植被的自然因素中,还有地质、土壤、水文等因素没有考虑进来[39-41]。地质因素中,地质构造能够影响地貌格局从而影响森林的群落分布,岩石中的矿物质成分对森林植物生长有较大影响。土壤能够给森林植物提供大量的养分,其中的有机质、微生物和水分等是植物生长的必要条件。水文因素中,汛期、径流量等对流域内的地表水和地下水有较大影响,而这些水源是植物生长的重要因素。今后将在地质类指标中引入岩性-岩相、综合地层、地质构造等指标,在土壤类指标中引入土壤有机质、土壤类型、微生物、水分等指标,在水文类指标中引入汛期、结冰期、径流量等指标。

参考文献(References):

[1] 刘心竹,米锋,张爽,苏立娟,顾艳红,张大红.基于有害干扰的中国省域森林生态安全评价.生态学报,2014,34(11):3115-3127.

[2] 侯鹏,杨旻,翟俊,刘晓曼,万华伟,李静,蔡明勇,刘慧明.论自然保护地与国家生态安全格局构建.地理研究,2017,36(3):420-428.

[3] 冯继广,丁陆彬,王景升,姚萍萍,姚帅臣,王志凯.基于案例的中国森林生态系统服务功能评价.应用生态学报,2016,27(5):1375-1382.

[4] 刘婷婷,孔越,吴叶,祝凌云,张大红.我国省域森林生态安全研究——基于熵权模糊物元模型.生态学报,2017,37(15):1-10.

[5] 吴霜,延晓冬,张丽娟.中国森林生态系统能值与服务功能价值的关系.地理学报,2014,69(3):334-342.

[6] 冯彦,郑洁,祝凌云,辛姝玉,孙博,张大红.基于 PSR 模型的湖北省县域森林生态安全评价及时空演变.经济地理,2017,37(2):171-178.

[7] 汪有奎,郭生祥,汪杰,袁虹,徐柏林,王多尧.甘肃祁连山国家级自然保护区森林生态系统服务价值评估.中国沙漠,2013,33(6):1905-1911.

[8] 李国伟,赵伟,魏亚伟,方向民,高波,代力民.天然林资源保护工程对长白山林区森林生态系统服务功能的影响.生态学报,2015,35(4):984-992.

[9] 陈岩,张智光,谢煜,彭森.中国省域林业生态安全格局的预警性测度——生态与产业共生的视角.农林经济管理学报,2015,14(5):480-489.

[10] 褚家佳,张智光.森林生态安全与森林食品安全相互作用机理模型研究.林业经济问题,2014,34(2):107-112,192.

[11] Moraes R, Landis W G, Molander S. Regional risk assessment of a Brazilian Rain Forest reserve. Human and Ecological Risk Assessment, 2002, 8(7):1779-1803.

[12] Hayes E H, Landis W G. Regional ecological risk assessment of a near shore marine environment: Cherry Point, WA. Human and Ecological Risk Assessment, 2004, 10(2):299-325.

[13] 毛旭鹏,陈彩虹,郭霞,周丹华,胡焕香.基于 PSR 模型的长株潭地区森林生态安全动态评价.中南林业科技大学学报,2012,32(6):82-86.

[14] 米锋,谭曾豪迪,顾艳红,鲁莎莎,张大红.我国森林生态安全评价及其差异化分析.林业科学,2015,51(7):107-115.

[15] 冯彦,祝凌云,郑洁,辛姝玉,张大红.基于 PSR 模型和 GIS 的吉林省县域森林生态安全评价及时空分布.农林经济管理学报,2016,15(5):546-556.

[16] 王金龙,杨伶,李亚云,张大红.中国县域森林生态安全指数——基于 5 省 15 个试点县的经验数据.生态学报,2016,36(20):6636-6645.

[17] 吴小节,曾华,汪秀琼,陈修德.中国生态文明发展重心与经济重心轨迹对比分析.华东经济管理,2016,30(2):34-41.

[18] 曹慧明,董仁才,邓红兵,余丽军,刘建军,王豪伟,马赫.区域生态系统重心指标的概念与应用.生态学报,2016,36(12):3639-3645.

[19] 郑永贤,薛菲,张智光.森林旅游景区生态安全 IRDS 模型实证研究.资源科学,2015,37(12):2350-2361.

[20] 苏子友,潘发明,唐庆良,盛兴军.川西南山地区主要森林类型生态安全评价研究.资源科学,2016,37(6):27-31.

[21] 周亚东.基于景观格局与生态系统服务功能的森林生态安全研究.热带作物学报,2015,36(4):768-772.

[22] 陈道军,瞿王龙,李育才,吴小舟,苟树屏.甘肃省森林生态安全动态评价研究.草业学报,2016,25(12):188-193.

[23] 赵筱青,王兴友,谢鹏飞,张龙飞.基于结构与功能安全性的景观生态安全时空变化——以人工园林大面积种植区西盟县为例.地理研究.2015,34(8):1581-1590.

[24] 尹新哲,李菁华,雷莹.森林公园旅游环境承载力评估——以重庆黄水国家森林公园为例.人文地理,2013,130(2):154-158.

[25] 张俊霞,段文军,赵立禄,朱磊.漓江流域森林生态旅游承载力三重矢量评价模型的构建.西北林学院学报,2013,28(3):245-249.
[26] 宋静波,李婷婷,吴黎,齐闯.大小兴安岭地区森林灾害承载力评价.湖北农业科学,2015,54(23):6043-6046.
[27] 许红红,李小梅,张江山,吴明珠.基于 PSR-TOPSIS 模型的闽侯县生态安全动态评价.亚热带资源与环境学报,2013,8(2):72-79.
[28] 赵海凤,刘川源,鲁莎莎,张大红.基于区位模型的四川森林生态服务价值核算研究.河南农业大学学报,2015,49(6):831-837.
[29] 李英,齐丹坤.基于生态区位测度的伊春林区森林生态服务功能价值评估.林业科学,2013,49(8):140-147.
[30] 高玲,赵智杰,张浩,关学斌,肖明.基于生境质量与生态区位的海口市生态系统服务价值估算.北京大学学报:自然科学版,2012,48(5):833-840.
[31] 齐丹坤,李晓,张怀,李英.基于古林法的伊春林区不同等级森林生态区位测度研究.林业经济问题,2014,34(2):145-148.
[32] 张频,张邦文,蔡海生,金苏蓉,韩天一.江西省林业生态安全物元分析评价.江西农业大学学报,2013,35(4):791-797.
[33] 祝凌云,张大红.吉林省长白县森林生态承载力评价.生态科学,2016,36(5):176-182.
[34] 谢余初,巩杰,张玲玲.基于 PSR 模型的白龙江流域景观生态安全时空变化.地理科学,2015,35(6):790-797.
[35] 赵金龙,王泺鑫,韩海荣,康峰峰,张彦雷.森林生态系统服务功能价值评估研究进展与趋势.生态学杂志,2013,32(8):2229-2237.
[36] 张智光.基于生态-产业共生关系的林业生态安全测度方法构想.生态学报,2013,33(4):1326-1336.
[37] 任光前,李铁松,曹帆,李成明.南充市森林承载力评价研究.新疆环境保护,2015,37(1):13-17.
[38] 米锋,潘文婧,朱宁,李华晶.模糊综合评价法在森林生态安全预警中的应用.东北林业大学学报,2013,41(6):66-75.
[39] 沈文星,李锋,牛利民.我国木质林产品贸易与森林生态安全耦合度研究.世界林业研究,2013,26(1):69-73.
[40] 秦晓楠,卢小丽,武春友.国内生态安全研究知识图谱——基于 Citespace 的计量分析.生态学报,2014,34(13):3693-3703.
[41] 丁国强,刘文英,肖彩虹,高岗.呼和浩特市森林承载力综合评价研究.内蒙古林业科技,2016,42(4):49-53.

